第 37 卷第 5 期 生 态 学 报 Vol.37,No.5
2017 年 3 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Mar.,2017

DOI: 10.5846/stxb201509301987
刘尉, 王丽华, 符饶, 周世兴, 刘林, 吴小辉, 黄从德.增加降水对干旱河谷区云南松人工林土壤呼吸的影响.生态学报,2017,37(5):1391-1400.
Liu W, Wang L H, Fu R, Zhou S X, Liu L, Wu X H, Huang C D.Effects of precipitation increase on soil respiration of a *Pinus yunnanensis* plantation in a dry river valley area.Acta Ecologica Sinica,2017,37(5):1391-1400.

增加降水对干旱河谷区云南松人工林土壤呼吸的影响

刘 尉[1], 王丽华[2], 符 饶[1], 周世兴[1], 刘 林[1], 吴小辉[3], 黄从德[1,*]
1 四川农业大学林学院, 成都 611130
2 四川阿坝师范学院, 汶川 623002
3 四川石棉县林业局, 雅安 625400

摘要:2013 年 5 月至 2014 年 6 月,对干旱河谷区云南松(*Pinus yunnanensis*)人工林进行增加降水试验,试验设置对照(CK, 0 mm m^{-2} a^{-1})、增水 10%(A1, 80 mm m^{-2} a^{-1})、增水 20%(A2, 160 mm m^{-2} a^{-1})和增水 30%(A3, 240 mm m^{-2} a^{-1}) 4 个处理水平。采用 LI-8100 开路式土壤碳通量测量系统测定每月土壤呼吸速率。结果表明,4 个处理云南松人工林土壤呼吸速率均呈明显的季节变化,7 月最高,2 月最低。与 CK 相比,A1 年均土壤呼吸速率无显著性差异(P>0.05),A2 显著增加了 12.88%(P<0.05),而 A3 明显减少了 17.71%(P<0.05)。3 个增水处理均提高了土壤呼吸的温度敏感性,减弱了土壤呼吸与土壤湿度的关系。与土壤温度相比,土壤湿度对土壤呼吸的影响相对较小。增水增加了湿季土壤微生物碳、氮含量,干季对微生物碳含量无影响,但明显降低了微生物氮含量。这说明,降水增加对干旱河谷区云南松人工林土壤呼吸的影响是不尽相同的,适当的增水会促进土壤呼吸,而过量的增水会抑制土壤呼吸。

关键词:增加降水; 土壤呼吸; 云南松人工林

Effects of precipitation increase on soil respiration of a *Pinus yunnanensis* plantation in a dry river valley area

LIU Wei[1], WANG Lihua[2], FU Rao[1], ZHOU Shixing[1], LIU Lin[1], WU Xiaohui[3], HUANG Congde[1,*]
1 *College of Forestry, Sichuan agricultural university, Chengdu* 611130, *China*
2 *ABA Teachers University, Wenchuan* 623002, *China*
3 *Forestry Bureau of Shimian, Ya'an* 625400, *China*

Abstract: The objective was to examine the effects of global climate change inducing precipitation pattern change on soil respiration (Rs) of *Pinus yunnanensis* plantation in dry river valley area of China(Shimian, Yaan, Sichuan). Based on average annual precipitation, Four treatments were set, ie, CK(natural state,0 mm m^{-2} a^{-1}), A1(increasing precipitation 10%, 80 mm m^{-2} a^{-1}), A2(increasing precipitation 20%, 160 mm m^{-2} a^{-1}) and A3(increasing precipitation 30%, 240 mm m^{-2} a^{-1}). Soil respiration rate was measured using LI-8100 monthly from Jun, 2013 to May, 2014. Results indicate that soil respiration rate exhibited obvious seasonal variation in *Pinus yunnanensis* plantation, with the maximum in July and the minimum in February. Precipitation increase treatment significantly increased Rs in A2 (by 12.88%), significantly decreased Rs in A3 (by 17.71%), and did not significantly affect Rs in A1. Soil respiration Q_{10} value calculated from soil temperature was increased under precipitation increase treatments. The relationship between soil respiration and soil moisture was weakened. Compared with soil temperature, soil moisture had less effect on the soil respiration. In wet season, microbial biomass carbon (MBC) and microbial biomass nitrogen (MBN) were increased significantly by increasing

基金项目:国家"十二五"科技支撑项目(2010BAC01A11)
收稿日期:2015-09-30; **网络出版日期:**2016-07-13
*通讯作者 Corresponding author.E-mail: lyyxq100@ aliyun.com

precipitation. In dry season, only MBN decreased significantly under precipitation treatments. Therefore, there was a significant effect of different increasing precipitation on soil respiration in a *Pinus yunnanensis* plantation in the dry river valley area. Moderate increasing rainfall would promote soil respiration, while superfluous increasing rainfall would inhibit soil respiration.

Key Words: increasing rainfall; soil respiration; *pinus yunnanensis* plantation

土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的重要环节,在维持全球碳平衡中发挥着十分重要的作用[1-2]。作为陆地生态系统碳循环的关键过程之一,土壤呼吸与全球气候变化有着密切关系。研究表明,大气环流和水文循环受全球气候变化的影响,已经导致了降水的时空分布格局发生变化[3],这将使得土壤呼吸变得更加不确定,最终影响全球碳循环[4-5]。因此,土壤呼吸规律与机制对降水格局变化的响应是当前区域碳收支及全球气候变化研究中的一个热点问题。

土壤呼吸是一个复杂的生物学过程,受到多种因素(生物因素、非生物因素和人类活动)的影响[6-8]。其中,土壤水分是影响土壤呼吸的主要因素之一。降水是土壤水分的主要来源,并通过调控地下生物化学过程,进而影响土壤呼吸,这种作用在干旱和半干旱地区尤为明显[9]。目前关于降水对土壤呼吸影响的研究已取得了较大进展[1, 10-11],但结果还不确定[12-14]。而且多数研究以降水事件和短期降水为主[1],在时间尺度上相对较短,缺乏长时间的观测和动态研究;研究区域也集中在干旱和半干旱地区的草原和荒漠生态系统[11, 15],而森林生态系统相对较少,如 Wang 等[16]在中国亚热带松树林中研究了土壤呼吸对降水的响应。

四川省雅安市石棉县地处干旱河谷区,具有明显的干湿两季,降水历史记录[17]表明,在 20 世纪 50 至 70 年代和 90 年代至今,该地区降水量均呈上升趋势,尤其 2000 年初期降水量明显增加,相比于 20 世纪 90 年代降水增加 48%。云南松(*Pinus yunnanensis*)是该区域主要的人工林树种,但少有关于云南松林人工林土壤呼吸的研究报道。因此,本研究以干旱河谷区云南松人工林为对象,通过研究增加降水对林下土壤呼吸的影响,旨在为深入研究该区域森林土壤碳循环过程对降水变化的响应与适应提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区位于四川省雅安市石棉县境内(29°14′030″N, 102°21′882″E),该地区属于中纬度亚热带湿润气候区,具有冬春无严寒、夏秋多雨无酷热的特点。干湿季节分明,雨季雨量充沛,光照充足,呈垂直型气候,高山、中山、河谷气候反差大,研究区是典型的干旱河谷区。年降水量 801.3 mm,降水多集中于 6—9 月份,约占全年降水量 82.2%,年均气温 16.9 ℃。试验地位于石棉县鸡公山南面阳坡半山腰处(海拔约 1145 m),该林地为云南松人工林。区域地势平坦(坡位中部,坡度 3 °)、人为干扰较小,林分属于单层成熟林(郁闭度 0.7)。林地内乔木层以云南松为主(平均树高 10.6 m,平均胸径 14.8 cm),灌木层以小马鞍叶羊蹄甲(*Bauhinia faberi var. Microphylla*)、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)为主,较为稀疏,草本层以石棉南星(*Arisaema shihmienense H. Li*)、须芒草(*Andropogon yunnanensis Hack.*)、素羊茅(*Festuca modesta Steud.*)等为主,灌草盖度 60%—75%。林下松针凋落物较明显,厚度 1—2 cm。土壤以黄棕壤土为主,土层厚度大于 30 cm,土壤湿度(土壤体积含水量)年均为(45.21±1.47)%,土壤容重(1.24±0.16) g/cm^3,0—15 cm 土壤总碳和总氮含量分别为(24.86±3.18) g/kg 和(1.34±0.35) g/kg。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计

2013 年 5 月,在云南松人工林中设置立地条件基本一致的 12 个 4 m×4 m 的样方。随机区组设计,沿东南水平方向(即与坡面垂直的方向)设置 3 个平行试验区组,在每个区组内设置 4 个样方。每个样方四周设

大于 2 m 的缓冲带,并在缓冲带内插入 PVC 板(埋入深度 15 cm),目的在于阻止地表径流的流入,但不影响深层土壤的水分交流。

增加降水设计:试验设置对照(CK,年增水量 0 mm/m^2)、增水 10%(A1,年增水量 80 mm/m^2)、增水 20%(A2,年增水量 160 mm/m^2)和增水 30%(A3,年增水量 240 mm/m^2)4 个处理水平,每个处理 3 个重复。增水量以该地区多年年平均降水量 801.3 mm 和历史最大增水量 48%为依据(陈建等, 2009)。年增水量计算公式:样方年增水量(mm)= 单位面积年平均降水量(mm/m^2)×增水百分比(%)×样方面积(m^2)。

增水处理具体方式:为了尽量与自然降水保持一致,根据研究区全年降水月分布情况,将全年增水处理分为干季和湿季,处理周期于 2013 年 6 月至 2014 年 5 月,共计 1a。干季:该季降水量约占年降水量 20%,共 8 个月(1—5 和 10—12 月份),增水处理按照每月 3 次进行,即每月的 5、15、25 日,每次依照表 1 内水量浇水。湿季:该季降水量约占年降水量 80%,共 4 个月(6—9 月份),增水处理方式与干季相同(表 1)。浇水量计算公式为:每次小样方浇水量(L)= 每月每次小样方增水量(mm)×1 L/mm。1 L/mm 为降水量与水体积换算系数。浇水方式:利用喷壶装水,将所需增水量均匀缓慢喷洒到各小样方内。

表 1　各处理水平干湿季小样方增水量

Table 1　Increasing amount of water dry-wet season in the small quadrat on each level

处理 * Treatments	干、湿季年增水量 The quantity of water of dry and wet season/mm	每月增水量 The quantity of water on each month/mm	每次增水量 The quantity of water on each time/mm	每次浇水量 The watering quantity on each time/L
CK	0+0#	0+0	0+0	0+0
A1	256+1024	32+256	10.7+85.3	10.7+85.3
A2	512+2049	64+512	21.3+170.7	21.3+170.7
A3	768+3072	96+768	32.0+256	32.0+256

* CK: 对照 Control; A1: 增水量 10% Precipitation +10%; A2: 增水量 20% Precipitation +20%; A3: 增水量 30% Precipitation +30%;#加号左侧为干季,右侧为湿季

1.2.2　土壤呼吸测定

在各样方内随机布置 2 个呼吸环(共计 24 个),呼吸环上部高出地面约 2 cm。所有呼吸环均由内径为 20 cm、高为 8 cm 左右的 PVC 管制成。从 2013 年 6 月开始到 2014 年 5 月,在每月 10—14 号(即增加降水前 1—4 d)之间选择无雨的一天,在 9:00—12:00 的 3 h 内用 LI-8100 开路式土壤碳通量测量系统(LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska, USA)测定土壤呼吸,24 个呼吸环循环测定 3 次。以当日呼吸速率平均值作为该月土壤呼吸速率的平均值。

1.2.3　土壤温度和湿度测定

利用 Apresys 温湿度记录仪(UTH-179, Apresys, USA)测定土壤温度和湿度动态变化。从 2013 年 6 月开始到 2014 年 5 月结束,在各样方中部埋放(土下 10 cm 左右)记录仪,仪器设定全天 24 h 每隔 3 h 记录 1 次土壤温度和湿度,每月末取出记录仪拷贝数据,充电并重置仪器再次埋放。

1.2.4　土壤微生物生物量碳、氮测定

2014 年 9 月(湿季结束)和 2015 年 5 月(干季结束),在各样方内采用五点取土法,用土钻($\Phi = 5$ cm)采集表层(0—15 cm)土壤样品,并标记装袋以供测定,每次取样共 12 袋。微生物生物量碳、氮采用氯仿熏蒸-硫酸钾提取法并通过总有机碳氮测定仪(Shimadzu model TOC-VcPH+TNM-1, Kyoto, Japan)测定[18]。

1.3　数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2003 软件整理数据和绘制图表,并利用 SPSS 19.0(SPSS Inc., USA)软件进行统计分析,对土壤温度、土壤湿度、土壤呼吸速率和土壤微生物生物量碳、氮进行重复测量方差分析(Repeated measures ANOVA),采用最小显著差数法(LSD 法)进行多重比较。对年均土壤呼吸速率和年累积土壤呼吸进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和 LSD 法多重比较。利用线性和非线性模型对土壤呼吸速率与土壤温

度、湿度进行拟合。通过相关性分析干湿季土壤呼吸速率和土壤微生物生物量碳、氮的关系。

土壤呼吸对温度的敏感性系数(Q_{10})计算公式为:

$$Q_{10}=e^{10\beta}$$

式中,β 为土壤呼吸速率与温度单因素指数曲线模型 $R_s=\alpha e^{\beta t}$ 中的温度反应常数(R_s 为土壤呼吸速率,α 为温度 0℃时土壤呼吸速率,β 为温度反应常数)。将土壤呼吸速率及相对应的土壤温度进行指数曲线回归,将所得 β 值代入上述公式计算出各处理水平的值 Q_{10}[18]。

土壤呼吸速率标准化到 10 ℃时计算公式为:

$$R_{S10}=R_S e^{b(10-T)}$$

式中,R_{S10} 为标准化到 10 ℃的土壤呼吸速率,R_S 为与土壤温度相对应的实测土壤呼吸速率,e 为常数,b 为土壤呼吸速率与土壤温度间由指数方程得出的拟合参数,T 为相对应土壤温度[15,19]。

土壤微生物生物量碳、氮计算公式为:

$$\mathrm{MBC}=[(TC_1-IC_1)-(TC_0-IC_0)]/K_C;\mathrm{MBN}=(TN_1-TN_0)/K_N$$

式中,MBC 为微生物生物量碳(Microbial biomass carbon),TC_1 为熏蒸样品总碳,IC_1 为熏蒸样品无机碳,TC_0 为未熏蒸样品总碳,IC_0 为未熏蒸样品无机碳,MBN 为微生物生物量氮(Microbial biomass nitrogen),TN_1 为熏蒸样品总氮,TN_0 为未熏蒸样品总氮,K_C、K_N 分别为微生物生物量碳、氮转换系数[18]。

2 结果与分析

2.1 增加降水对土壤温度和湿度的影响

云南松人工林土壤温度具有明显的季节动态(图 1),各处理间无显著差异(P>0.05)。不同处理水平下土壤温度均以 7 月最高,1 月最低,年均温度分别为 15.9 ℃(CK)、15.6 ℃(A1)、15.4 ℃(A2)和 15.5 ℃(A3)。

如图 1 可见,林下土壤湿度具有明显的干湿季特征,即湿季(6—9 月)土壤湿度高,干季(10 月—次年 5 月)低。湿季各处理之间无显著性差异(P>0.05),干季 3 个增水处理始终高于 CK(P<0.05),但处理间无明显差异(P>0.05)。各处理年均湿度分别为 45.21%(CK)、46.00%(A1)、46.42%(A2)和 46.82%(A3),其中 A2 和 A3 与 CK 有显著性差异(P<0.05)。

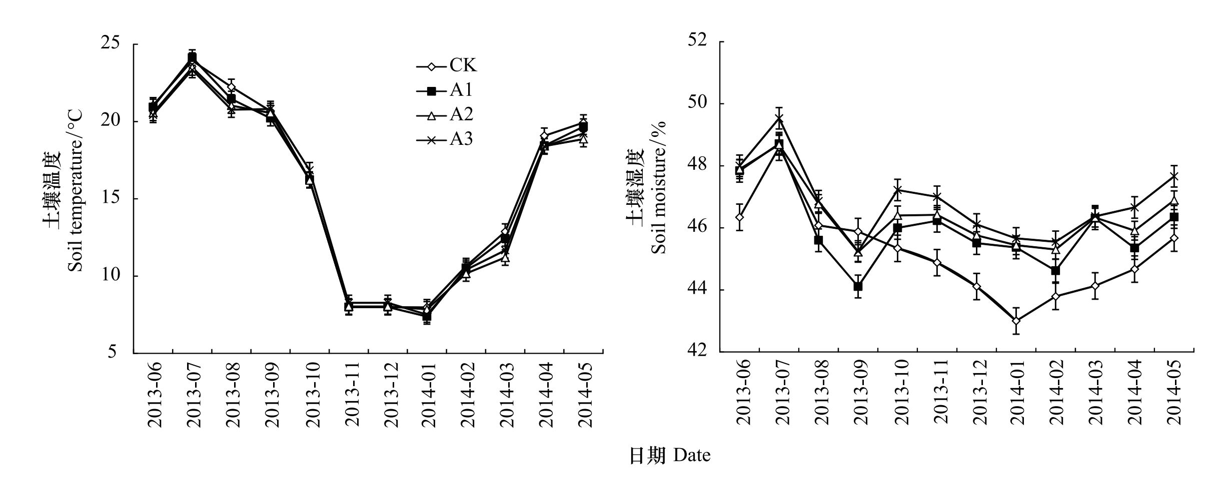


图 1 云南松人工林各处理土壤温度和湿度的季节变化(平均值±标准误)

Fig.1 Seasonal variations of soil temperature, and soil moisture among different treatments in the *Pinus yunnanensis* plantation(mean±SE)

A:土壤温度 Soil temperature; B:土壤湿度 Soil moisture; CK:对照 Control; A1:增水量 10% Precipitation +10%; A2:增水量 20% Precipitation +20%; A3:增水量 30% Precipitation +30%; 土壤温度和湿度测定深度均为 10 cm, 每个数据点是每月观察的平均值 Soil temperature and moisture measurement depth are 10 cm. Each value in the plot represents the average value of sech site on measurement month

2.2　增加降水对土壤呼吸速率的影响

由图 2 可见,云南松人工林各处理土壤呼吸速率具有明显的月动态,7 月最高,2 月最低,与土壤温度的变化趋势相同。从图 3 可看出,CK 的年均土壤呼吸速率为(2.58±1.40) μmol m^{-2} s^{-1},年排放的碳为(981.89±45.02) g/m^2。增水处理后,A1、A2 和 A3 年均土壤呼吸速率分别为(2.36±1.20) μmol m^{-2} s^{-1}、(2.91±1.90) μmol m^{-2} s^{-1}和(2.12±1.28) μmol m^{-2} s^{-1},年排放的碳分别为(898.91±38.40) g/m^2、(1109.02±60.27) g/m^2和(807.47±40.83) g/m^2。重复测量方差分析表明,A1 与 CK 无显著性差异(P>0.05),A2 显著促进了土壤呼吸(P<0.05),相比 CK 增加了 12.88%,而 A3 明显抑制了土壤呼吸(P<0.05),相比 CK 降低了 17.71%。年累积土壤呼吸方差分析也表明,A2 显著促进了云南松人工林土壤 CO_2排放量,A3 明显抑制土壤 CO_2排放(图 2)。

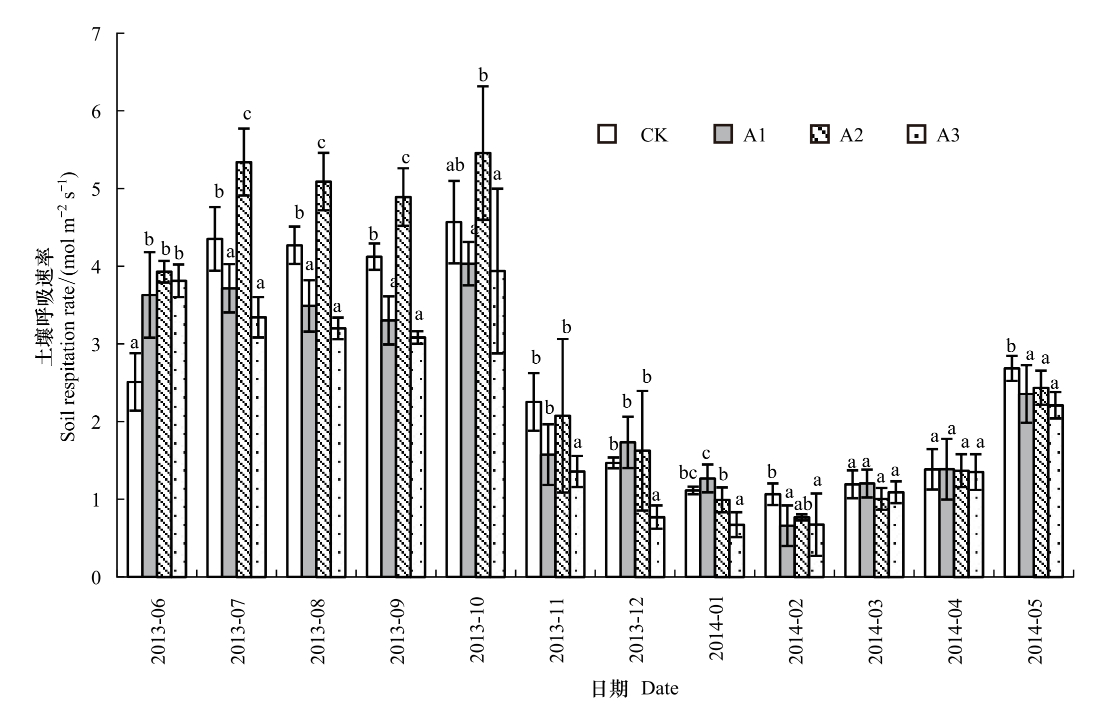


图 2　云南松人工林各处理土壤呼吸速率月动态(平均值±标准差)

Fig.2　Monthly dynamics of soil respiration in each treatment in the *Pinus yunnanensis* plantation(mean±SD)

CK:对照 Control; A1:增水量 10% Precipitation +10%; A2:增水量 20% Precipitation +20%; A3:增水量 30% Precipitation +30%; 不同字母表示同月不同处理间差异显著(P<0.05) Different letter mean significant different of soil respiration among different treatments within the same month (P<0.05)

2.3　土壤呼吸速率与土壤温度和湿度的关系

林下各处理土壤呼吸速率与土壤温度呈显著正指数关系(图 4, 表 2),基于土壤温度的土壤呼吸温度敏感系数(Q_{10})分别为 1.95(CK)、2.01(A1)、2.59(A2)、2.77(A3),其中 A2 和 A3 与 CK 有明显差异性(P<0.05),较 CK 分别增加了 32.00%和 42.00%。这说明,增水提高了土壤呼吸的温度敏感性。

表 2　土壤呼吸速率与土壤温度的回归方程参数(平均值±标准差, n=12)

Table 2　Coefficients for the relationship models betwewn the soil respiration rate and soil temprature (mean±SD)

处理 Treatments	模型* Model	P	R^2	Q_{10}
CK	$R_S=0.774e^{0.067t}$	<0.05	0.496	1.95a
A1	$R_S=0.690e^{0.070t}$	<0.05	0.526	2.01a
A2	$R_S=0.543e^{0.095t}$	<0.05	0.575	2.59b
A3	$R_S=0.355e^{0.111t}$	<0.05	0.746	2.77b

* $R_s=\alpha e^{\beta t}$ 为指数模型 index model; R_s:土壤呼吸速率 soil respiration rate; t:土壤温度 soil temperature; α 和 β 为拟合参数 α and β: fitting parameters

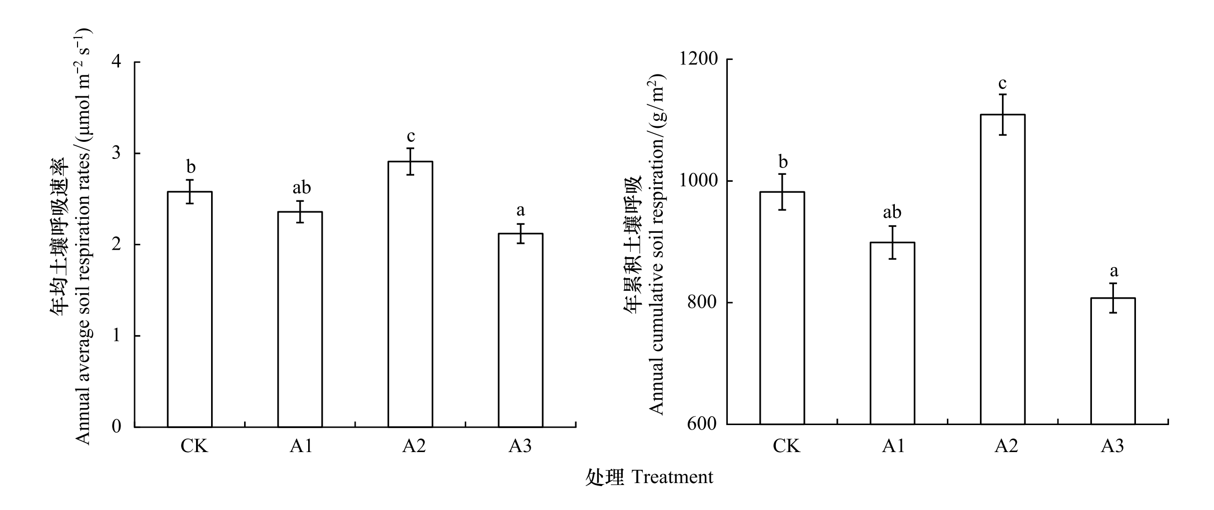


图 3　云南松人工林各处理年均土壤呼吸速率和年累积土壤呼吸(平均值±标准差)

Fig.3　Annual average soil respiration rates and cumulative soil respiration among different treatments in the *Pinus yunnanensis* plantation (mean±SD)

A:年均土壤呼吸速率 Annual average soil respiration rates; B:年累积土壤呼吸 Annual cumulative soil respiration; CK:对照 Control; A1:增水量 10% Precipitation +10%; A2:增水量 20% Precipitation +20%; A3: 增水量 30% Precipitation +30%; 不同字母表示同月不同处理间差异显著 (P<0.05) Different letter mean significant different of soil respiration among different treatments (P<0.05)

采用线性和指数函数两种模型拟合了土壤呼吸速率与土壤湿度的关系(图 5, 表 3),结果显示线性方程可解释林下各处理土壤呼吸速率月动态变化的18.60%—60.40%,指数方程可解释 19.40%—65.40%,增水处理的两个回归方程的 R^2 值明显小于 CK。这表明,增水降低了土壤呼吸与土壤湿度的关系。

为了将土壤温度对土壤呼吸的影响减小到最低,按照同类方法[15, 19]将实测土壤呼吸速率转化为 10 ℃时的土壤呼吸速率(R_{S10}),同样按照线性和指数函数两种模型拟合了 10 ℃时的土壤呼吸速率与土壤湿度的关系(图 5, 表 3)。结果显示两种模型拟合均未达到显著水平,线性方程仅解释林下各处理 10 ℃时的土壤呼吸速率月动态变化的 1.80%—6.50%,指数方程仅解释 2.50%—9.80%,变异解释量 R^2 较上述分析有明显下降。同时,增水处理的两个回归方程的 R^2 值也明显小于 CK。相比土壤呼吸与土壤温度的关系,土壤湿度对土壤呼吸速率和 10 ℃时的土壤呼吸速率的变异解释量均低于土壤温度对土壤呼吸的变异解释量。这说明,增水不仅降低了土壤呼吸与土壤湿度的关系,而且与土壤温度相比,土壤湿度对土壤呼吸的影响相对较小。

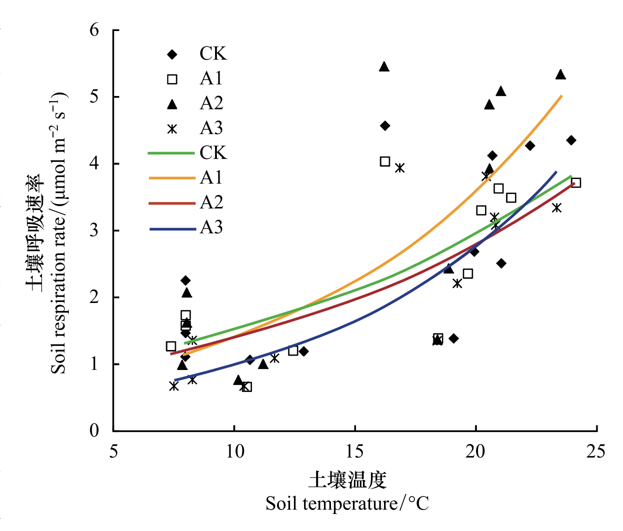


图 4　云南松人工林各处理土壤呼吸速率与土壤温度的关系

Fig. 4　Relationship between soil respiration rates and soil temperature among different treatments in the *Pinus yunnanensis* plantation

2.4　增加降水对土壤微生物生物量碳、氮含量的影响

从图 6 可看出,湿季结束后,增水处理(除 A3 外)的土壤微生物生物量碳含量升高,A2 最高,为 CK 的 2.49倍;3 个增水处理的生物量氮含量均明显高于 CK(P<0.05),分别较 CK 升高了 38.84%(A1)、258.22%(A2)和 115.91%(A3)。干季结束后,各处理间土壤微生物生物量碳含量无显著性差异(P>0.05),而增水处理的生物量氮含量较CK有明显降低(P<0.05),其中A3最低,仅为CK的37.00%。相关分析表明(表4),干

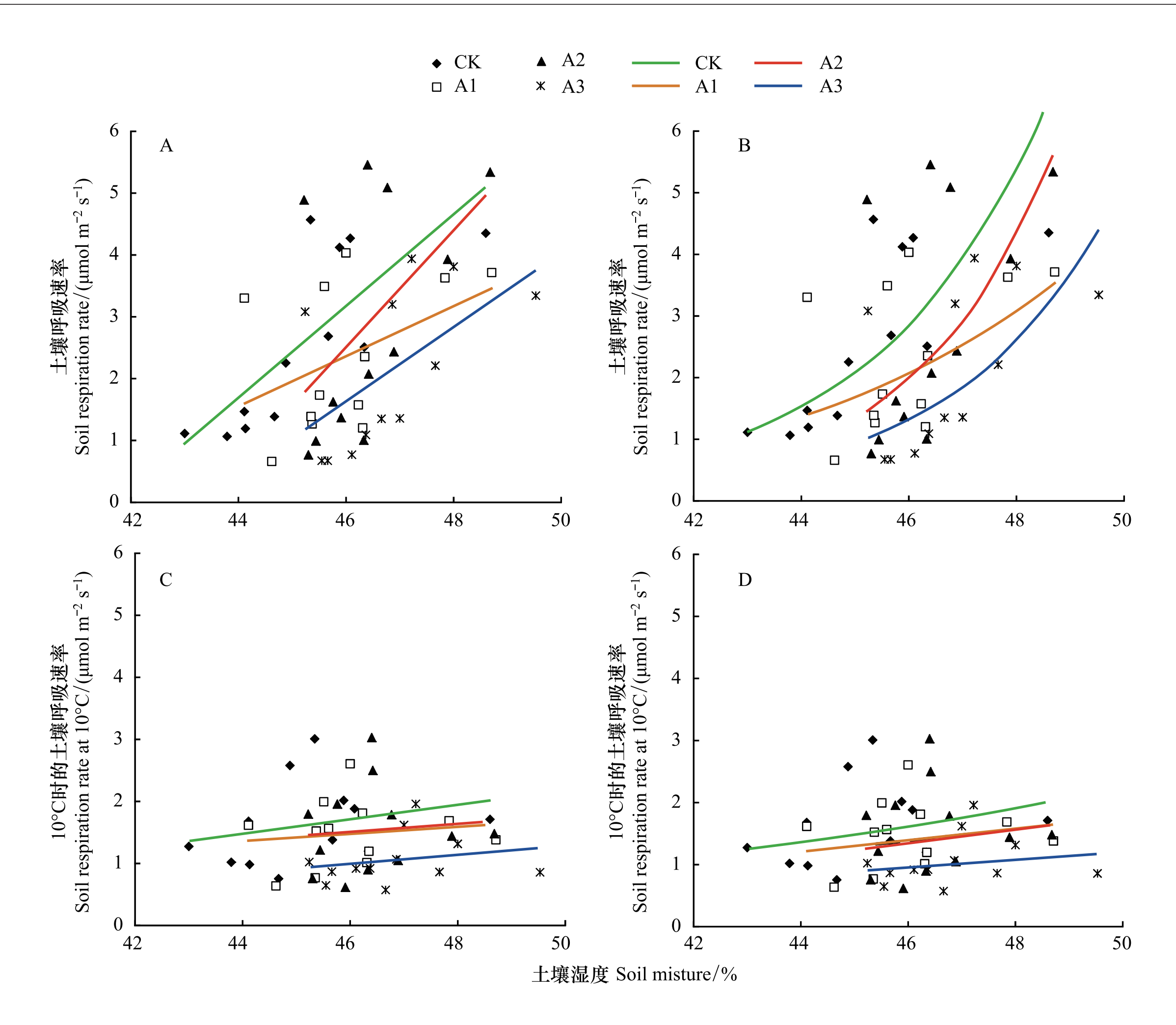


图 5　云南松人工林各处理土壤呼吸速率及标准化到 10 ℃时土壤呼吸速率与土壤湿度的关系

Fig.5　Relationship between soil respiration rates(normalized soil respiration using the fit of Q_{10} function at 10 ℃) and soil moisture among different treatments in the *Pinus yunnanensis* plantation

A:土壤呼吸速率与土壤湿度的线性关系 linear relationship between R_s and t; B:土壤呼吸速率与土壤湿度的指数关系 Index relationship between R_s and m; C:标准化到 10 ℃时土壤呼吸速率与土壤湿度的线性关系 linear relationship between R_{10s} and m; D:标准化到 10 ℃时土壤呼吸速率与土壤湿度的指数关系 Index relationship between R_{10s} and m; CK:对照 Control

表 3　土壤呼吸速率及标准化到 10 ℃时土壤呼吸速率与土壤湿度的两种回归方程拟合(平均值±标准差, n=12)

Table 3　Coefficients for the relationship models betwewn the soil respiration rate (normalized soil respiration using the fit of Q_{10} function at 10 ℃) and soil moisture(mean±SD)

处理 Treatments	模型* Model	P	R^2	标准化到 10 ℃时模型 Model at 10 ℃	P	R^2
CK	$R_S = 0.737m - 30.748$	0.003	0.604	$R_{S10} = 0.116m - 3.640$	0.422	0.065
	$R_S = 1.437 \times 10^{-4} e^{0.315m}$	0.001	0.654	$R_{S10} = 0.029e^{0.087m}$	0.322	0.098
A1	$R_S = 0.407m - 16.373$	0.162	0.186	$R_{S10} = 0.057m - 1.133$	0.680	0.018
	$R_S = 2.000 \times 10^{-4} e^{0.202m}$	0.152	0.194	$R_S = 0.069e^{0.065m}$	0.521	0.042
A2	$R_S = 0.935m - 40.472$	0.084	0.268	$R_{S10} = 0.058m - 1.131$	0.796	0.007
	$R_S = 2.873 \times 10^{-8} e^{0.392m}$	0.060	0.310	$R_S = 0.047e^{0.073m}$	0.623	0.025
A3	$R_S = 0.604m - 26.161$	0.055	0.321	$R_{S10} = 0.069m - 2.19$	0.516	0.043
	$R_S = 1.794 \times 10^{-7} e^{0.344m}$	0.041	0.354	$R_{S10} = 0.049e^{0.064m}$	0.493	0.048

* $R_s = am+b$ 为线性模型 linear model; $R_s = \alpha e^{\beta m}$ 为指数模型 index model; R_s:土壤呼吸速率 soil respiration rate; R_{S10} 为标准化到 10 ℃时的土壤呼吸速率 soil respiration rate at 10 ℃; m:土壤湿度 soil moisture; α 和 β 为拟合参数 α and β: fitting parameters; a 和 b 为拟合参数 a and b: fitting parameters

湿季土壤呼吸速率与土壤微生物生物量碳、氮含量有较高相关性,湿季各处理的土壤微生物生物量碳、氮与土壤呼吸速率相关系数分别为 0.912(P<0.01)和 0.752(P<0.05),干季则为 0.763(P<0.05)和 0.857(P<0.01)。

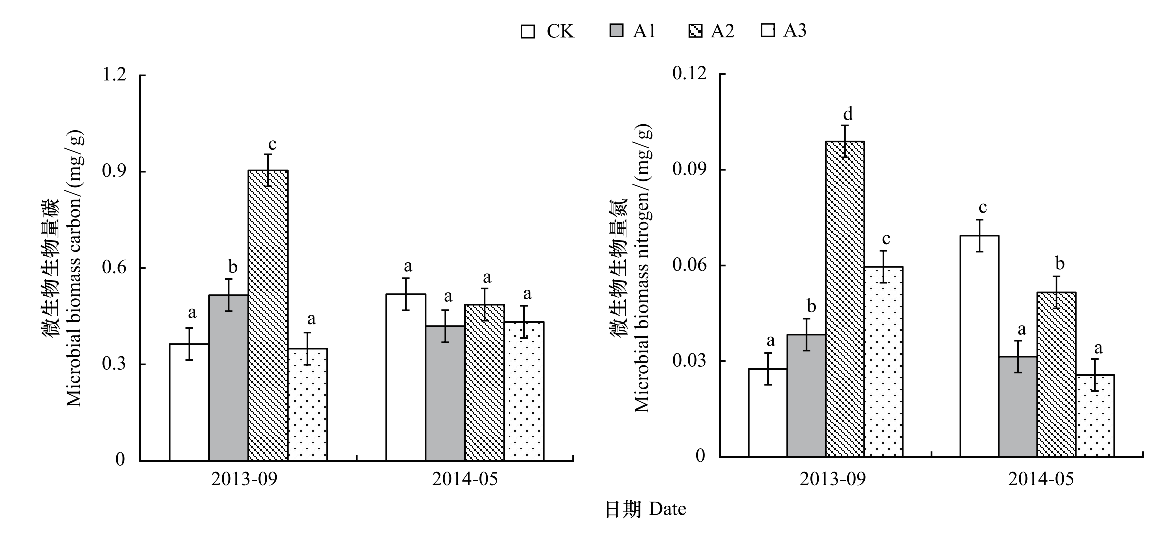


图 6 云南松人工林干湿季各处理土壤微生物生物量碳、氮含量(平均值±标准误)

Fig.6 Soil microbial biomass carbon and nitrogen content among different treatments in the *Pinus yunnanensis* plantation after dry and wet season(mean±SE)

A:土壤微生物生物量碳 soil microbial biomass carbon; B:土壤微生物生物量氮 soil microbial biomass nitrogen; CK:对照 Control; A1:增水量 10% Precipitation +10%; A2:增水量 20% Precipitation +20%; A3:增水量 30% Precipitation +30%; 不同字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)

表 4 干湿季土壤呼吸速率变化与土壤微生物生物量碳、氮的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between soil respiration rates and MBC, MBN after dry and wet season

季节 Season	土壤微生物生物量碳 MBC	土壤微生物生物量氮 MBN
湿季 Wet season	0.912	0.752
干季 Dry season	0.763	0.857

3 讨论

一般认为,土壤呼吸随着季节降水量的变化而呈正相关关系[7]。本研究表明,云南松人工林土壤呼吸具有明显的季节动态,7 月最高,2 月最低,这与多数研究结果[15,20]一致。这是因为 7 月份土壤温度和湿度较高(图 1),植物进入生长旺期,根系生长和土壤微生物活动也随之加强,土壤呼吸达到最高;2 月份土壤温度和湿度较低(图 1),根系生长和土壤微生物活动进入最弱期,进而土壤呼吸降至最低。

在干旱、半干旱与季节性干旱地区,降水引起的土壤水分波动容易使土壤呼吸变得更加不确定[21]。Holt 等[22]在澳大利亚昆士兰州北部热带半干旱的森林土壤呼吸研究中发现,降水增加使得土壤呼吸增加了 3 倍。而在中国台湾和哥伦比亚云雾林中,土壤呼吸受降水增加的影响明显被抑制[14]。本研究表明,在不同增水下,林下土壤呼吸对其的响应是不同的,A1 处理的年均土壤呼吸速率与 CK 无显著性差异(P>0.05),A2 显著促进了土壤呼吸(P<0.05),而 A3 明显抑制了土壤呼吸(P<0.05)。这是因为降水增加会导致土壤水分增加,土壤呼吸产生激发作用,增加了水分有效性和提高了生物活性,使土壤呼吸增加,但随着降水量的增加,土壤含水量继续升高会造成土壤孔隙堵塞,影响微生物和植物根系与氧气接触,导致土壤呼吸受到抑制[5]。也有研究发现,穿透雨量增加或减少(33%)对土壤总呼吸无显著性影响[23],这与土壤湿度较高有关系。同时,已有的研究还表明,降水会强烈的激发土壤呼吸,被称之为 Birch 效应[12],即降水发生后,土壤呼吸有明显增加,尤其对于干燥的土壤,该效应会持续 2—6 d[14]。但这种激发效应并非发生于所有的降水事件中,对于潮湿的

土壤,降水反而会抑制土壤呼吸[13]。本研究中增水处理于每月的 5、15 日和 25 日进行,并在每月的 10—14 日之间(即增加降水前 1—4 d)选择无雨的一天进行土壤呼吸测定,其结果是否会受到这种 Birch 效应的潜在影响仍需进一步研究。

土壤微生物呼吸是土壤呼吸的重要组成部分[2],而土壤微生物对水分变化很敏感[14]。本研究表明,增水促进了湿季云南松人工林土壤微生物生物量碳、氮含量,而干季对生物量碳含量无明显影响,生物量氮含量降低。Rosacker 等[24]对季节间土壤微生物数量的研究也发现,土壤微生物数量随着湿季的开始而增加,随着干季的到来而降低。多数研究表明,土壤微生物生物量与土壤呼吸存在显著正相关关系[1, 18]。本研究也表明,干湿季土壤呼吸速率与土壤微生物生物量碳、氮含量有较高相关性。这可能在湿季期间,增水导致了土壤中可溶性有机质的有效性和可移动性增加,进而增加了土壤中微生物的数量和活性[2],使得土壤微生物生物量碳、氮升高,最终导致土壤呼吸升高;干季期间,由于温度降低,土壤微生物活动处于休眠或抑制状态,增水过多便会导致土壤中可溶性有机质的流失,造成微生物活动受到较大抑制,甚至死亡[1],进而降低土壤呼吸。

土壤温度是影响土壤呼吸的重要因素,两者具有显著的相关关系[25]。本研究表明,林下不同处理土壤呼吸速率与土壤温度均呈显著正指数关系(表 4),与其他研究[26]一致。通常 Q_{10}值用来表示土壤呼吸对温度的敏感性。本研究发现,增水造成了土壤呼吸 Q_{10}值的升高(表 4),这与 Smith[27]的研究结果一致。这可能是增水改变了土壤水分状况,进而改变了土壤微生物活性,最终提高了土壤呼吸对温度的敏感性[28]。

土壤湿度对土壤呼吸也具有重要的影响,但通常条件下其作用不及土壤温度[26]。研究认为,土壤呼吸与水分之间的关系难以定性和定量[1],不过仍可用多种方程函数来表示两者关系[29-31]。本研究通过指数和线性函数拟合发现,云南松人工林土壤湿度对土壤呼吸速率和 10 ℃时的土壤呼吸速率的变异解释量均低于土壤温度对土壤呼吸的变异解释量,增水降低了土壤呼吸与土壤湿度的关系,这与张丽华等[15]的研究结果一致。这表明,与土壤温度相比,土壤湿度对土壤呼吸速率的影响相对较小。

综上所述,增加降水对干旱河谷区云南松人工林土壤呼吸速率的影响是不尽相同的,适当的增水会促进土壤呼吸,而过量的增水会抑制土壤呼吸。但由于土壤呼吸机制的复杂性,本研究仅从增加降水的角度探讨了土壤呼吸对降水变化的响应,要全面评价降水变化对森林土壤呼吸的影响还需进一步研究。

参考文献(References):

[1] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 阎志丹, 王艳芬, 张焱, 熊小刚, 陈世苹, 张丽霞, 高英志, 唐芳, 杨晶, 董云社. 典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性与土壤水分的关系. 生态学报, 2004, 24(4): 831-836.

[2] 邓东周, 范志平, 王红, 孙学凯, 高俊刚, 曾德慧, 张新厚. 土壤水分对土壤呼吸的影响. 林业科学研究, 2009, 22(5): 722-727.

[3] Oreskes N. The scientific consensus on climate change. Science, 2004, 306(5702): 1686-1686.

[4] Selsted M B, van der Linden L, Ibrom A, Michelsen A, Larsen K S, Pedersen J K, Mikkelsen T N, Pilegaard K, Beier C, Ambus P. Soil respiration is stimulated by elevated CO_2 and reduced by summer drought: three years of measurements in a multifactor ecosystem manipulation experiment in a temperate heathland (CLIMAITE). Global Change Biology, 2012, 18(4): 1216-1230.

[5] 高进长, 苏永红. 土壤呼吸对不同来源水分响应的研究进展. 干旱区研究, 2012, 29(6): 1014-1021.

[6] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in Picea abies stands. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(11-22): 1625-l635.

[7] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展. 地球科学进展, 2005, 20(7): 778-785.

[8] Zhou G S, Jia B R, Han G X, Zhou L. Toward a general evaluation model for soil respiration (GEMSR). Science in China Series C: Life Sciences, 2008, 51(3): 254-262.

[9] Sponseller R A. Precipitation pulses and soil CO_2 flux in a Sonoran Desert ecosystem. Global Change Biology, 2007, 13(2): 426-436.

[10] Miller A E, Schimel J P, Meixner T, Sickman J O, Melack J M. Episodic rewetting enhances carbon and nitrogen release from chaparral soils. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(12): 2195-2204.

[11] 刘涛, 张永贤, 许振柱, 周广胜, 侯彦会, 林琳. 短期增温和增加降水对内蒙古荒漠草原土壤呼吸的影响. 植物生态学报, 2012, 36(10): 1043-1053.

[12] Birch H F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. Plant and Soil, 1958, 10(1): 9-31.

[13] Davidson E A, Verchot L V, Catt? nio J H, Ackerman I L, Carvalho J E M. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 53-69.

[14] 王义东, 王辉民, 马泽清, 李庆康, 施蕾蕾, 徐飞. 土壤呼吸对降雨响应的研究进展. 植物生态学报, 2010, 34(5): 601-610.

[15] 张丽华, 陈亚宁, 赵锐锋, 李卫红. 温带荒漠中温度和土壤水分对土壤呼吸的影响. 植物生态学报, 2009, 33(5): 936-949.

[16] Wang Y D, Wang Z L, Wang H M, Guo C C, Bao W K. Rainfall pulse primarily drives litterfall respiration and its contribution to soil respiration in a young exotic pine plantation in subtropical China. Canadian Journal of Forest Research, 2012, 42(4): 657-666.

[17] 陈建, 梁川. 贡嘎山东坡地区气候变化特性研究. 中国农村水利水电, 2009, (4): 25-27, 30-30.

[18] 涂利华, 戴洪忠, 胡庭兴, 张健, 雒守华. 模拟氮沉降对华西雨屏区撑绿杂交竹林土壤呼吸的影响. 应用生态学报, 2011, 22(4): 829-836.

[19] Wang Y D, Li Q K, Wang H M, Wen X F, Yang F T, Ma Z Q, Liu Y F, Sun X M, Yu G R. Precipitation frequency controls interannual variation of soil respiration by affecting soil moisture in a subtropical forest plantation. Canadian Journal of Forest Research, 2011, 41(9): 1897-1906.

[20] 邓琦, 周国逸, 刘菊秀, 刘世忠, 段洪浪, 陈小梅, 张德强. CO_2 浓度倍增、高氮沉降和高降雨对南亚热带人工模拟森林生态系统土壤呼吸的影响. 植物生态学报, 2009, 33(6): 1023-1033.

[21] Huxman T E, Snyder K A, Tissue D, Leffler A J, Ogle K, Pockman W T, Sandquist D R, Potts D L, Schwinning S. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. Oecologia, 2004, 141(2): 254-268.

[22] Holt J A, Hodgen M J, Lamb D. Soil respiration in the seasonally dry tropics near Townsville, North-Queensland. Australian Journal of Soil Research, 1990, 28(5): 737-745.

[23] Hanson P J, O'Neill E G, Chambers M L S, Riggs J S, Joslin J D, Wolfe M H. Soil respiration and litter decomposition//Hanson P J, Wullschleger S D, eds. North American Temperate Deciduous Forest Responses to Changing Precipitation Regimes. New York: Springer, 2003: 163-189.

[24] Rosacker L L, Kieft T L. Biomass and adenylate energy charge of a grassland soil during drying. Soil Biology and Biochemistry, 1990, 22(8): 1121-1127.

[25] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO_2 efflux on temperature. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(2): 155-165.

[26] 严俊霞, 秦作栋, 张义辉, 李洪建. 土壤温度和水分对油松林土壤呼吸的影响. 生态学报, 2009, 29(12): 6366-6376.

[27] Smith V R. Soil respiration and its determinants on a sub-Antarctic island. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(1): 77-91.

[28] 杨庆朋, 徐明, 刘洪升, 王劲松, 刘丽香, 迟永刚, 郑云普. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性. 生态学报, 2011, 31(8): 2301-2311.

[29] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. Global Change Biology, 1998, 4(2): 217-227.

[30] Mielnick P C, Dugas W A. Soil CO_2 flux in a tallgrass prairie. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(2): 221-228.

[31] Liu X Z, Wan S Q, Su B, Hui D F, Luo Y Q. Response of soil CO_2 efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem. Plant and Soil, 2002, 240(2): 213-223.